

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 55 (1929)  
**Heft:** 14

**Artikel:** Sur l'économie d'une usine hydroélectrique à accumulation  
**Autor:** Haas, Rob. / Kromer, T.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-42668>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.12.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

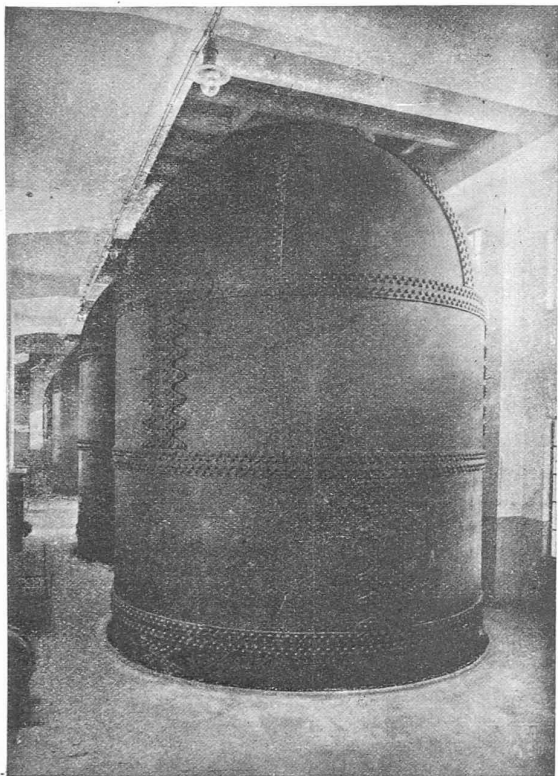


Fig. 5.  
Batterie d'autoclaves cuiseurs.

cellulose de bois, car les lessives elles-mêmes sont utilisées avec succès et en grandes quantités, sous forme d'arrosages, pour combattre la poussière des routes, grâce à leur précieuse propriété de se transformer, par exposition à l'air, en une masse dure, analogue à l'asphalte, adhérant fortement aux chaussées et exerçant une action antiseptique :

c'est le « Ligno-Sulfite, » bien connu des usagers de la route, et dont le pouvoir agglomérant est utilisé aussi à la confection de briquettes en poussier de charbon, au façonnage des noyaux de fonderie, etc.

## Sur l'économie d'une usine hydroélectrique à accumulation,

par M. le D<sup>r</sup> ROB. HAAS, directeur des « Kraftübertragungswerke Rheinfelden » et M. C. T. KROMER, ingénieur.

Traduction d'un article paru, sous ce titre, dans l'« Elektrotechnische Zeitschrift », N° 47, année 1928.

Les auteurs entendent par aménagements hydrauliques à accumulation ceux dans lesquels le débit de l'eau alimentant l'usine génératrice est réglable arbitrairement par emmagasinement dans un réservoir dont la capacité utile peut être accrue soit par le moyen des affluents naturels, soit par adduction de cours d'eau n'y affluant pas naturellement, soit par pompage.

Une usine à accumulation se différencie essentiellement d'une usine au fil de l'eau en ceci que, la puissance de cette dernière est conditionnée, une fois pour toutes, par la capacité des installations supposées appropriées aussi bien que possible au régime du cours d'eau. Aussi la puissance d'une usine au fil de l'eau détermine-t-elle sa valeur technique et économique. Au contraire, une usine à accumulation est caractérisée par la quantité d'énergie emmagasinable dans le réservoir, de sorte que, théoriquement tout au moins, il est indifférent que cette énergie soit utilisée sous la forme d'une grande puissance débitée pendant une courte durée ou sous la forme d'une faible puissance pendant un long temps. L'énergie emmagasinée est — dans des limites raisonnables — « soutirable » à volonté, à la façon du vin d'un tonneau. Des frais d'établissement, la part imputable aux travaux destinés à l'accumulation d'énergie est toujours bien supérieure à celle qui incombe à la production de puissance.

Si un réservoir comporte une tranche utile de  $Q$  m<sup>3</sup> d'eau et que la chute moyenne soit de  $H$  m, l'énergie emmagasinée, mesurée en kWh (1 kWh = 366 000 kgm) est

$$A = \frac{Q H 1000 \eta}{366 000}$$

$\eta$  étant le rendement moyen des conduites, des turbines et des génératrices.

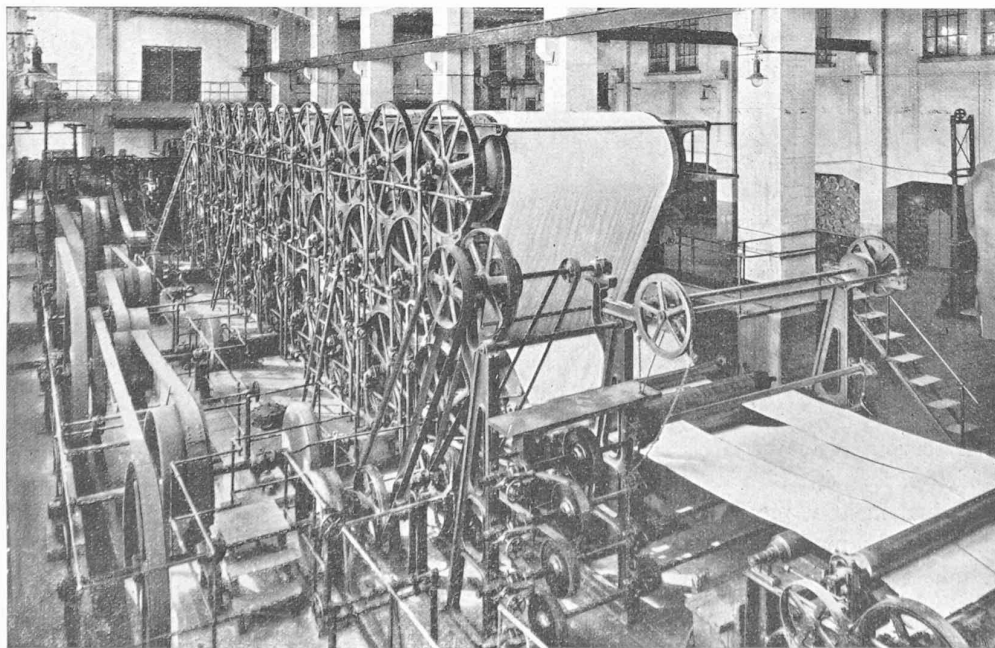


Fig. 6. — Séchage de la cellulose en feuilles.

## LA CELLULOSE DE BOIS ET SES SOUS-PRODUITS

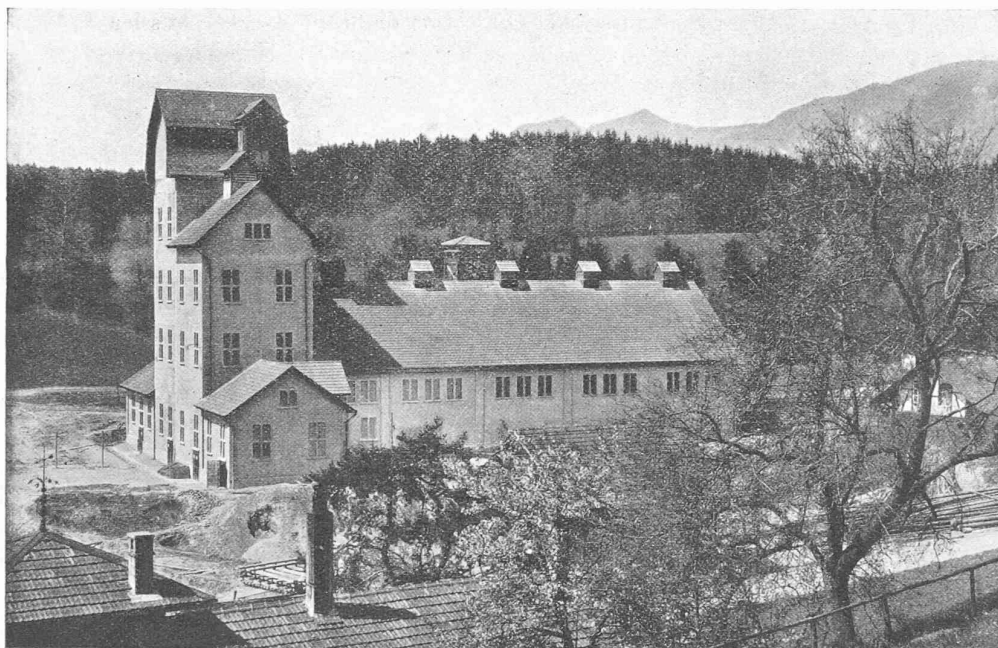


Fig. 7. — Fabrique d'alcool annexée à la Fabrique de cellulose de bois, à Attisholz.

En admettant les rendements accusés par les installations récentes, bien aménagées, et en supposant faibles les pertes d'eau par inétanchéité et par évaporation, on peut exprimer par la commode formule suivante l'énergie utile emmagasinée dans le réservoir

$$A = \frac{Q H}{500} \text{ (kWh)} \quad (1)$$

Si le réservoir peut être rempli  $n$  fois par an, l'énergie disponible annuellement sera

$$A_{an} = n \frac{Q H}{500} \text{ (kWh)}$$

Ces réservoirs sont « journaliers », « hebdomadaires » ou « saisonniers ».

*Réservoirs journaliers.* — La provision d'énergie emmagasinée est consommée en un jour ou, au plus en quelques jours, le plus souvent au moment des pointes. Si l'utilisation moyenne, journalière, du réservoir, pour couvrir ces déficits, est de  $t$  heures, on peut évaluer à

$$h = 300 t$$

l'utilisation annuelle, compte tenu des jours fériés. Le nombre  $n$  de remplissages annuels des réservoirs « journaliers » est voisin de 365.

*Réservoirs hebdomadaires.* — Ces réservoirs, de capacité un peu supérieure à celle des précédents, sont d'habitude remplis une fois chaque semaine, principalement au moyen de l'eau non utilisée par l'usine, la nuit, le samedi après-midi et le dimanche. Leur utilisation est vraisemblablement aussi exprimée par

$$h = 300 t$$

tandis que  $n$  est voisin de 52.

*Réservoirs saisonniers.* —

Ils sont destinés à emmagasiner l'eau en excès pendant certains mois de l'année, pour la restituer en temps de disette. Par exemple, pour les cours d'eau alpestres, l'emmagasinement aura lieu lors de la fonte des neiges et la restitution, en hiver. Ces réservoirs-là ne « couvrent » plus seulement les pointes mais font face aussi aux fluctuations des besoins de l'industrie. Leur utilisation annuelle varie entre 1000 et 2000 heures et le nombre  $n$  de leurs remplissages annuels entre 1 et 2, mais, dans des cas particuliers, des régimes différents sont possibles.

*Economie des usines à accumulation.*

Ces derniers temps, la question de savoir si une usine à vapeur est préférable à une usine hydraulique à accumulation, pour couvrir les pointes, a donné lieu à de nombreuses controverses qui ont même trouvé un écho dans le public. Or, les publications de *Træger* relatives à la supercentrale « Klingenberg », à Berlin, contenant des données précises sur le bilan calorifique d'une usine à vapeur récente en fonction de son degré d'utilisation, les auteurs ont estimé être en mesure de résoudre mathématiquement le problème du choix entre centrale de pointe, à vapeur, et centrale hydraulique à accumulation.

Pour établir une comparaison judicieuse entre les deux solutions, il faut commencer par analyser soigneusement les conditions hydrologiques auxquelles le réservoir est soumis. Car, pour un régime donné du réservoir, la quantité d'énergie disponible ne peut, contrairement à ce qui se passe dans les centrales à vapeur, être augmentée par un accroissement de l'utilisation. Ici, on l'a déjà relevé plus haut, ce qui est déterminant c'est l'énergie emmagasinée et non la puissance ; la puissance peut être accrue presque arbitrairement, aux dépens de l'utilisation, sans grande augmentation des frais. En conséquence, une usine hydraulique à accumulation étant caractérisée par sa *provision d'énergie emmagasinable*, l'unité à envisager, du point de vue économique, sera le *kilowattheure* et non le *kilowatt*. Désignant par  $b$  les dépenses d'établissement, en pfennigs, rapportées à 1 kWh, pour une usine à accumulation, alimentée seulement par des affluents naturels et admettant que les charges annuelles d'intérêts et d'amortissement, les dépenses d'exploitation et la constitution des réserves se montent à 11 % de ces

dépenses d'établissement, le prix de revient de 1 kWh emmagasiné est exprimé par

$$0,11 b \text{ (Pfennig)}$$

et les dépenses totales annuelles afférentes au réservoir sont de

$$0,11 A b$$

où  $A$  est l'énergie utile emmagasinable dans le réservoir en une année.

Passant au cas de l'alimentation partielle du réservoir par pompage, nous supposons que des  $A$  kWh emmagasinés, une fraction  $r$  l'est au moyen de pompes, de sorte que la fraction  $(1 - r)$  est imputable aux affluents naturels. Cette part d'énergie revient à

$$0,11 b A (1 - r) \text{ (Pfennig)}$$

tandis que l'énergie provenant du pompage revient à

$$0,11 b A r + 1,7 s A r$$

où  $s$  signifie le prix de revient de 1 kWh d'énergie fourni aux pompes et 1,7 traduit l'hypothèse, généralement admise que 1,7 kWh fourni aux pompes correspond à 1 kWh d'énergie emmagasinée et utilisable (en tenant compte du rendement des conduites, pompes, turbines et génératrices). Par suite les dépenses annuelles totales  $K_{an}$  afférentes à un tel réservoir seront

$$K_{an} = 0,11 b A (1 - r) + 0,11 b A r + 1,7 s A r \text{ (Pfennigs)}$$

ou

$$K_{an} = 0,11 b A + 1,7 s A r \quad (2)$$

et le prix de revient de 1 kWh sera de

$$\frac{K_{an}}{A} = k_h = 0,11 b + 1,7 s r \quad (3)$$

Calculons maintenant les mêmes prix pour une usine de pointe, à vapeur, susceptible de fournir la même énergie au moyen d'une puissance installée égale à  $L$  kW et dans l'hypothèse d'une utilisation annuelle de  $h$  heures. Alors

$$L h = A$$

Admettons que les dépenses d'établissement de la centrale à vapeur soient de 260 RM (marks) par kW, majorés de 15 % pour tenir compte de la réserve nécessaire, et calculant, d'après la formule de *Træger*, la quantité de chaleur mise en jeu, nous obtiendrons le prix de revient de 1 kWh en résolvant l'égalité

$$K_v = \frac{4800 + 3224 C h + 2 950 000 C}{h} \text{ (Pfennig)} \quad (4)$$

où  $C$  représente le prix de la calorie-kilog dans le combustible envisagé.

L'usine hydraulique à accumulation sera équivalente, au point de vue économique, à l'usine à vapeur si le prix de revient du kWh thermique et celui du kWh hydraulique sont égaux, c'est-à-dire si

$$0,11 b + 1,7 s r = \frac{4800 + 3224 C h + 2 950 000 C}{h}$$

d'où

$$b = \frac{43 500 + 29 500 C (h + 900)}{h} - 15,4 s r \text{ (Pf/kWh)} \quad (5)$$

égalité qui peut s'écrire sous la forme

$$b = 29 500 C - 15,4 s r + \frac{43 500 + 26 500 000 C}{h} \quad (6)$$

Pour des conditions données de l'usine hydraulique à accumulation et un prix donné du charbon, les deux premiers termes du second membre de cette égalité sont des constantes et le troisième terme est le quotient d'une quantité constante par une quantité variable  $h$ , de sorte que l'égalité en question est de la forme

$$b = k_1 + \frac{k_2}{h}$$

et représente donc une hyperbole. Pour  $h = 0$   $b = \infty$  et, pour  $h$  très grand  $b$  tend asymptotiquement vers la valeur fixe  $k_1$ .

En langage ordinaire, cette équation signifie que pour réaliser l'équivalence économique des deux systèmes de génération, le prix de 1 kWh d'énergie hydraulique emmagasinée ne doit pas être supérieur à la somme des deux termes du membre de droite. Ce prix d'établissement est fonction, en première ligne, de l'utilisation, mais aussi, dans chaque cas, du prix du combustible, du rapport entre la quantité d'eau fournie par les affluents naturels et la quantité fournie par les pompes, et du prix de l'énergie consommée par les pompes. Plus le prix du combustible est élevé, plus le réservoir peut être cher; plus les pompes consomment d'énergie, et, en outre, plus cette énergie est chère, plus faible doit être le prix du kWh hydraulique emmagasiné. Enfin, les dépenses d'établissement du réservoir peuvent être d'autant plus élevées que l'utilisation est plus faible.

#### Exemples.

Les auteurs appliquent leurs conceptions à deux cas concrets d'usines hydrauliques à accumulation, celle de Wäggital (Suisse) et l'usine projetée du Schluchsee (Bade).

L'usine de Wäggital, conçue pendant la guerre et achevée après la guerre, à une époque où l'approvisionnement de la Suisse en charbon était difficile et onéreux, était justifiée, économiquement, et constituait même une nécessité au point de vue politique. Les dépenses de construction de l'aménagement, en deux paliers, s'élevèrent à 75 millions de francs, en chiffres ronds, l'énergie utile emmagasinée dans le bassin par les affluents naturels et l'adduction de quelques autres petits cours d'eau est de 110,5 millions de kWh, l'énergie emmagasinée par pompage équivalant à 25 millions de kWh. L'eau pompée dans le réservoir travaillant sur les deux paliers, on peut admettre qu'il faut fournir seulement 1,3 kWh aux pompes pour obtenir 1 kWh d'énergie emmagasinée utile. Le prix du charbon à Zurich étant (à la fin de l'année 1928) de 40 marks la tonne et l'utilisation  $h$ , de 1300 heures, en évaluant à 4 millions de francs les dépenses de construction de la ligne de transmission à Zurich, et en tenant

compte des pertes au cours de cette transmission, le prix de revient « paritaire » du kWh, calculé par la méthode de MM. Haas et Kromer, ressort à 54 pfennigs et, en fait, le kWh a bien coûté 54 pfennigs. A lui seul, indépendamment des autres avantages inhérents aux usines hydrauliques à accumulation, ce résultat justifie l'entreprise du Wäggital. En vue de tenir compte de la moindre cherté de l'argent, en Suisse, MM. Haas et Kromer ont réduit de 1 % les charges financières.

Le premier palier de l'aménagement, projeté, du Schluchsee est devisé à 43,3 millions de marks, pour une accumulation utile de 130 millions de kWh, dont environ 60 millions emmagasinés par pompage. Utilisation : 1300 heures. Confrontons cette installation hydraulique avec une usine de pointe, à vapeur, située au bord du Rhin, au voisinage de Karlsruhe, susceptible de développer 100 000 kW en brûlant du charbon à 7200 calories/kg, coûtant 30 marks la tonne. Introduites dans l'équation (6), ces données conduisent à un prix « paritaire » du kWh hydraulique emmagasiné de 46 pfennigs, tandis que d'après le devis ce prix sera de

$$\frac{43,3}{130} = 33 \text{ Pfennigs}$$

Conclusion : le Schluchseewerk à accumulation est des plus intéressants, au point de vue économique. Dans leurs calculs, relatifs à ce dernier aménagement, les auteurs ont fait abstraction des frais de transmission de l'énergie parce que la grande ligne à haute tension du « Badenwerk » passe au voisinage de la future usine. Le raccordement d'une usine à vapeur située au bord du Rhin aurait coûté à peu près la même somme.

#### *Frais de la transmission d'énergie.*

Les frais de transmission de l'énergie électrique du lieu de production au lieu de consommation constituent, suivant la situation de l'usine à vapeur et de l'usine hydraulique à accumulation, un facteur qu'il ne faut pas perdre de vue lors de l'établissement des calculs.

Conjointement avec cette comparaison des deux modes de génération de l'énergie, il faut envisager les frais de transmission de l'énergie jusqu'au lieu de consommation, qui peuvent jouer un rôle important et qu'on évaluera en conformité des situations respectives de la centrale thermique et de l'usine à accumulation hydraulique.

#### *Réserve.*

Primitivement, les auteurs avaient admis une réserve de 30 % pour l'usine de pointe, à vapeur, mais ils estiment, avec le Dr Marguerre, qu'on pourrait se tirer d'affaire avec 15 % seulement. Peut-être, pourrait-on même, dans le cas d'usine thermique de pure pointe, se passer de réserve, parce que, aux époques de faible charge, en été par exemple, en l'absence de pointes d'éclairage, il sera possible de procéder à la révision des machines. La même observation s'applique à l'usine hydraulique. Aujourd'hui il n'est peut-être plus rationnel de se prémunir par des groupes de réserve contre des perturbations subites de

l'exploitation car, en raison de l'interconnexion des usines, on peut compter, le plus souvent, sur un secours temporaire.

Une usine hydraulique à accumulation est dotée d'un avantage particulier du fait qu'elle constitue une espèce de réserve instantanée, la mise en charge d'un de ses groupes se faisant très rapidement. Au contraire, dans le cas de l'usine à vapeur, il faut attendre que les chaudières soient mises en pression, opération qui dure toujours quelques heures.

#### *Considérations d'économie privée et publique.*

Outre la question de rentabilité matérielle, il y a lieu de tenir compte aussi de considérations d'ordre économique et politique. Parmi les avantages de la « solution hydraulique », il faut mettre en bon rang le fait que l'eau se renouvelant constamment la richesse nationale n'est pas amoindrie par la production d'énergie électrique, tandis que le charbon consommé est à jamais perdu. De plus les ouvrages hydrauliques ne s'usent ni vieillissent guère, tandis qu'une usine à vapeur se déprécie rapidement. Toutefois une usine thermique de pure pointe s'use plus lentement, à cause de sa faible utilisation et, au surplus, pour la même raison, il est moins important qu'elle travaille avec le rendement maximum mais, malgré cela, il faudra la renouveler plus tôt qu'une usine hydraulique à accumulation. Dès que celle-ci sera amortie, le prix de revient de l'énergie sera très bas, en opposition avec la centrale thermique pour laquelle les dépenses de combustible et de main-d'œuvre augmentent vraisemblablement avec le temps, ainsi que les frais de renouvellement des installations. L'usine hydraulique à accumulation comporte donc, par rapport à la centrale thermique, maints avantages non traduisibles par des chiffres mais susceptibles de déterminer le choix dans les cas douteux. Cependant le capital d'établissement d'une usine hydraulique est toujours plus grand, fait qui n'est pas négligeable en présence de la pénurie de capitaux qui sévit en Allemagne.

Il y a lieu de considérer encore qu'une usine thermique possède de bien plus grandes « disponibilités » qu'une usine hydraulique. En effet, pour cette dernière, la production annuelle d'énergie  $A_{an}$  étant fixée, approximativement, par la formule établie ci-dessus, savoir

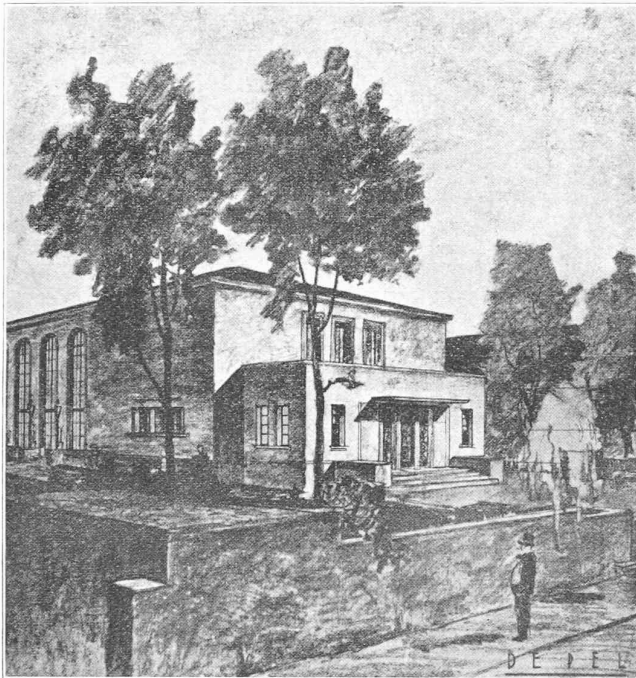
$$A_{an} = n \frac{QH}{500} \text{ (kWh)}$$

le régime de cette production est conditionné, dans d'étroites limites, par la disposition originelle des installations. Au contraire, une usine thermique, pourvu qu'elle soit dotée d'une réserve suffisante, dispose, théoriquement au moins, d'une capacité de production annuelle égale à

$$8760 L \text{ (kWh)}$$

si  $L$  est sa puissance installée (sans la réserve).

En d'autres termes : une centrale thermique « de pointe » peut fonctionner comme centrale « de base »,

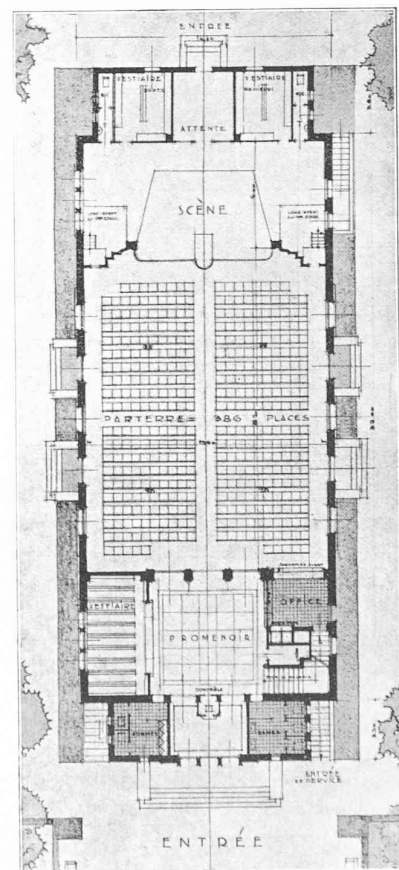
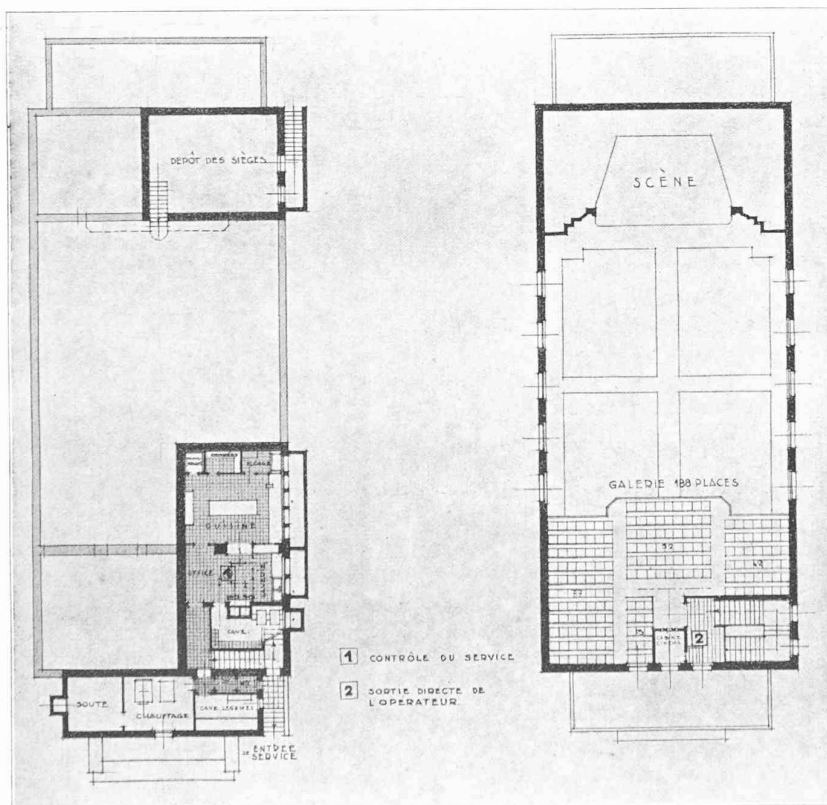


CONCOURS POUR UNE GRANDE SALLE  
A LA TOUR DE PEILZ

1<sup>er</sup> rang, projet «De Pel», de M. Eug. Mamin,  
architecte, à Lausanne.

Plans du sous-sol, du rez-de-chaussée et de la galerie.

Echelle 1 : 400.



tandis que ce serait un non-sens économique de faire subir ce changement de rôle à une usine hydraulique à accumulation. L'appréciation des raisons qui militent pour ou contre le choix d'une des deux solutions implique donc la considération de motifs d'ordre économique et politique, même au cas où la question a été tranchée «arithmétiquement» par la méthode de calcul décrite ci-dessus.

**Concours d'idées pour la construction d'une Grande Salle, à La Tour de Peilz.**

Ce concours d'idées était ouvert entre les architectes de nationalité suisse, régulièrement établis dans le district de Vevey depuis cinq ans au moins, ainsi qu'aux architectes, bourgeois de la commune de La Tour-de-Peilz, établis en Suisse.